

УДК 621.926

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОГО КЛАССИФИКАТОРА НА АЭРОДИНАМИКУ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗМЕЛЬЧЕННОГО ПРОДУКТА В СРЕДНЕХОДНОЙ МЕЛЬНИЦЕ**

**А.С. ДОРОГОКУПЕЦ, д-р техн. наук, проф. П.Е. ВАЙТЕХОВИЧ,  
канд. техн. наук, доц. В.С. ФРАНЦКЕВИЧ  
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)**

*Демонстрируется исследование аэродинамики воздушного закрученного пространственного потока в сечении помольно-классификационного агрегата, включающего валковую среднеходную мельницу и динамический классификатор, при помощи компьютерного моделирования. Представлены иллюстративные закономерности распределения профиля скоростей в горизонтальных и вертикальном сечениях. Показана эффективность классификации продукта при различных скоростях вращения корзины динамического сепаратора. Установлено, что попутное с основным потоком газовой среды вращение ротора обеспечивает более эффективную классификацию измельченного продукта.*

**Введение.** До недавнего времени изучение поведения газожидкостных систем было ограничено экспериментальными методами, но в связи с быстрым ростом производительности компьютерных систем стало возможным анализировать и рассчитывать подобные процессы даже на персональных компьютерах. Вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics) сегодня становится одной из составляющих процесса проектирования во множестве компаний, которые разрабатывают современное высокотехнологичное оборудование. Подобные расчеты позволяют получить характеристики устройства задолго до его изготовления и внедрения. Вычислительная гидродинамика используется во многих отраслях промышленности, таких как автомобильная, аэрокосмическая, энергетическая. Теплообменное оборудование, вентиляция и кондиционирование воздуха, биомедицинские приложения, нефтяная и газовая промышленность, судостроение – это отрасли, в которых применение CFD-технологий становится залогом создания конкурентоспособных изделий.

В последнее время среднеходные мельницы, в частности валковые фирм «Леше», «Пфайфер», начали активно внедряться в Республике Беларусь. Это агрегаты исключительно сухого помола с воздушной классификацией, обладающие высокой производительностью и низкими удельными энергозатратами. С учетом двух указанных показателей это в первую очередь подходит для таких крупнотоннажных технологий, как производство цемента, извести, гипса, доломита, где и используются. В свою очередь, конструктивные особенности таких агрегатов предусматривают наличие линейки небольших габаритов, что обуславливает их применение в малотоннажных технологиях, например при производстве медпрепаратов.

Учитывая большие перспективы данного типа помольного оборудования, мы на протяжении последнего десятилетия активно занимались его исследованием и оптимизацией. Мотивацией для начала исследований были два аргумента: во-первых, страна, испытывающая большую потребность в помольных агрегатах, не может их постоянно покупать за рубежом; во-вторых, при использовании импортных измельчителей необходимы специалисты, которые будут квалифицированно осуществлять их эксплуатацию и ремонт.

В процессе предыдущих исследований детально изучен размольный узел среднеходной валковой мельницы: движение материала, воздушного потока в зоне помола [1], энергетики процесса [2]. На втором этапе исследовалась сепарационная зона [3], в том числе и с использованием компьютерного моделирования [4]. Одним из важных выводов всех исследований можно считать то, что для равномерного распределения несущего воздушного потока и предотвращения возможности провала материала под размольную тарелку воздух в подтарельчатое пространство должен подаваться тангенциально. Вторым вывод заключается в том, что оптимальной конструкцией устройства для классификации измельченного продукта следует считать динамический роторный классификатор.

**Основная часть.** В качестве объекта исследования принят динамический роторный классификатор среднеходной мельницы. Для равномерной подачи воздушной среды в зону помола снизу помольного агрегата выполнены три тангенциальных патрубка под углом 120° в горизонтальной плоскости друг к другу, а в верхней части установлен динамический классификатор, в качестве ротора которого используется сепарационная корзина. В процессе исследований решалось две задачи. Первая заключалась в исследовании аэродинамики воздушного потока в сепарационной зоне, вторая – в определении эффективности классификации измельченного продукта. Варьируемыми параметрами принимались скорость и направление вращения ротора сепарационного устройства. Направление вращения задавалось по ходу движения основного газового потока и в противоположную сторону. Его частота изменялась ступенчато и составляла 300 и 600 об/мин, что соответствовало линейной скорости по среднему диаметру ротора 10 и 20 м/с.

Из-за сложности и непредсказуемости распределения скоростей газа в зоне ротора было принято решение прибегнуть к компьютерному моделированию. Причем это реализовывалось в программном комплексе ANSYS CFX. Предварительно в программном комплексе Solid Works был смоделирован помольно-сепарационный агрегат с реальными геометрическими соотношениями. Внутренний диаметр корпуса мельницы – 350 мм, высота мельницы – 550 мм, количество валков – 2, средний диаметр валков – 160 мм,

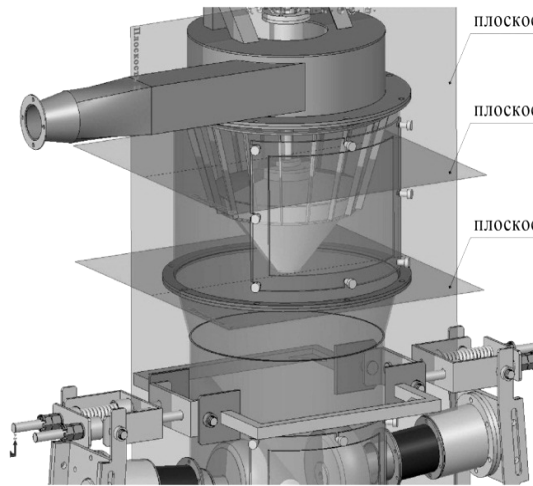


Рис. 1. Рассматриваемые сечения

диаметр размольной тарелки 300 мм, внутренний диаметр корпуса динамического сепаратора – 400 мм, высота – 305 мм, усредненный диаметр ротора 315 мм, высота – 270 мм. В качестве исходных параметров для расчета задавались: частота вращения тарелки –  $100 \text{ мин}^{-1}$ , массовый расход газа на выходе составлял  $0,2 \text{ кг/с}$  (т.е. модель компоновки, при которой вентилятор установлен после помольно-сепарационного агрегата), размер твердой фазы при плотности  $1800 \text{ кг/м}^3$  –  $10 \dots 100$  и  $200 \dots 1000 \text{ мкм}$ .

Аэродинамическая обстановка в зоне сепарации анализировалась в двух горизонтальных плоскостях и одной вертикальной (рис. 1). Плоскость А – под корзиной ротора; плоскость Б – в его центральной части; вертикальная плоскость В отсекала корпуса помольного агрегата по оси симметрии. Основным определяемым параметром принято поле скоростей газа в каждом из сечений.

В качестве основной модели для определения полей скоростей газа в программном комплексе ANSYS CFX приняты уравнения Рейнольдса, являющиеся модификацией уравнения Навье – Стокса [5]. Рейнольдс принял допущение, что мгновенную скорость газа  $U$  можно представить в виде осредненной по времени скорости  $\bar{U}$  и ее турбулентных пульсаций  $U'$ :

$$U = \bar{U} + U' . \quad (1)$$

Для решения уравнений Рейнольдса использована полуэмпирическая теория турбулентности Прандтля, заключающаяся во введении параметра, называемого длиной пути смешения  $l$ , на котором постулируется сохранение определенных характеристик турбулентного потока. В результате получена линейная зависимость между турбулентными напряжениями и осредненными скоростями потока. При этом турбулентные напряжения в цилиндрической системе координат выражаются следующим образом [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{rr} = -\rho \cdot \bar{U}_r'^2 = 2 \cdot \mu_T \cdot \left( \frac{dU_r}{dr} \right); \\ \tau_{\phi\phi} = -\rho \cdot \bar{U}_\phi'^2 = 2 \cdot \mu_T \cdot \left( \frac{1}{r} \frac{dU_\phi}{d\phi} + \frac{U_r}{r} \right); \\ \tau_{zz} = -\rho \cdot \bar{U}_z'^2 = 2 \cdot \mu_T \cdot \left( \frac{dU_z}{dz} \right); \\ \tau_{r\phi} = -\rho \cdot \bar{U}_r' \cdot \bar{U}_\phi' = \mu_T \cdot \left( \frac{1}{r} \frac{dU_r}{d\phi} + \frac{dU_\phi}{dr} - \frac{U_\phi}{r} \right); \\ \tau_{rz} = -\rho \cdot \bar{U}_r' \cdot \bar{U}_z' = \mu_T \cdot \left( \frac{dU_r}{dz} + \frac{dU_z}{dr} \right); \\ \tau_{\phi z} = -\rho \cdot \bar{U}_\phi' \cdot \bar{U}_z' = \mu_T \cdot \left( \frac{dU_\phi}{dz} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU_z}{d\phi} \right), \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $\mu_T$  – коэффициент турбулентной вязкости.

Таким образом, появилась возможность турбулентные течения рассматривать как фиктивные ламинарные с неньютоновским коэффициентом вязкости.

Далее для закрученного потока введены следующие допущения: 1) поток в камере ассиметричен и квазистационарен; 2) изменение всех параметров камеры по оси значительно меньше, чем по радиусу; 3) коэффициент молекулярной вязкости  $\mu$  значительно меньше коэффициента турбулентной вязкости  $\mu_T$ , причем последний – величина скалярная.

Тогда с учетом этих допущений и уравнений (2) в цилиндрической системе координат уравнение Рейнольдса и неразрывности потока можно записать в виде:

$$\begin{cases} U_r \cdot \frac{dU_\varphi}{dr} + \frac{U_r \cdot U_\varphi}{r} = \frac{\mu_T}{\rho} \cdot \left( \frac{d^2 U_\varphi}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU_\varphi}{dr} - \frac{U_\varphi}{r^2} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\mu_T}{dr} \cdot \left( \frac{dU_\varphi}{dr} - \frac{U_\varphi}{r} \right); \\ U_r \cdot \frac{dU_r}{dr} - \frac{U_\varphi^2}{r} = \frac{\mu_T}{\rho} \cdot \left( \frac{d^2 U_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU_r}{dr} - \frac{U_r}{r^2} \right) + \frac{2}{\rho} \cdot \frac{d\mu_T}{dr} \cdot \frac{dU_r}{dr} - \frac{1}{r} \cdot \frac{d\rho}{dr}; \\ U_r \cdot \frac{dU_z}{dr} = \frac{\mu_T}{\rho} \cdot \left( \frac{d^2 U_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dU_z}{dr} \right) + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\mu_T}{dr} \cdot \frac{dU_z}{dr}; \\ \frac{dU_r}{dr} + \frac{U_r}{r} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Приведенная система уравнений имеет аналитическое решение, а также решается с использованием компьютерных программ. При аналитическом решении вводятся дополнительные обозначения, объединяющие ряд параметров, таких как кинетическая энергия турбулентности на единицу массы  $k_T$ , скорость диссипации  $\varepsilon$  [7]. Эта так называемая « $k_T - \varepsilon$ » модель турбулентности является самой распространенной при анализе аэро- и гидродинамики закрученных течений и использована в программном комплексе ANSYS CFX. Результаты расчетов с помощью программного комплекса ANSYS CFX представлены в виде поля распределения скоростей по всему объему помольно-сепарационного агрегата.

На рисунке 2 показано распределение осевой составляющей скорости газа (плоскость В) при линейной скорости вращения ротора 10 и 20 м/с в разных направлениях.

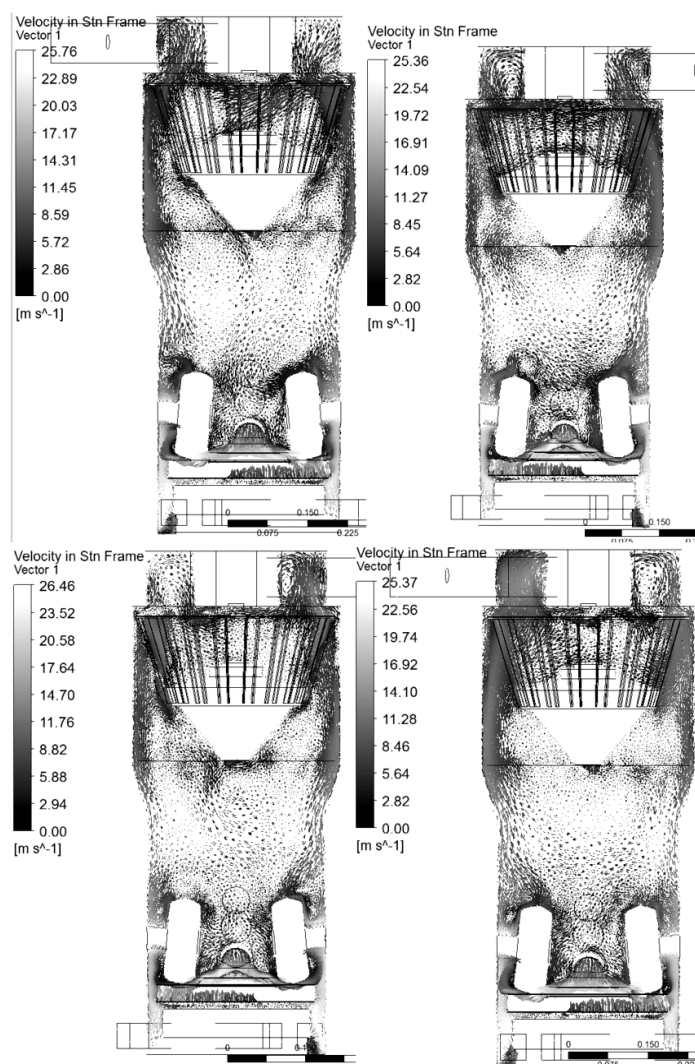


Рис. 2. Распределение осевой составляющей полной скорости газового потока

Видно, что в кольцевом зазоре, образованном торцом размольной тарелки и корпусом мельницы, осевая скорость составляет в среднем около 25 м/с, что достаточно для выноса неизмельченного рассматриваемого материала в сепарационную зону и предотвращения провала. Далее основная часть газового потока движется вблизи стенок помольного агрегата со скоростью 8...10 м/с. На подходе к сепаратору при вращении ротора в попутном направлении поток перераспределяется, равномерно перекрывая все сечение. Скорость газового потока при проходе через лопасти корзины и внутри нее стабильна и составляет около 10 м/с. Такая скорость обеспечивает хорошее отделение легких частиц от крупной фракции и удаление их из сепаратора. При встречном вращении ротора за счет создаваемого им подпора скорость газа снижается до 5 м/с, что не позволяет большей доле частиц транспортироваться через лопасти корзины сепаратора. При увеличении скорости вращения ротора до 20 м/с осевая скорость в межлопаточном пространстве ротора динамического сепаратора увеличивается, а по его оси возникают зоны с отсутствием движения газа. Ротор сам становится транспортирующим или препятствующим движению устройством, а не сепаратором. В сечениях с горизонтальными плоскостями *A* и *B* получено распределение суммарной скорости, описываемой уравнением:

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_\varphi^2 + U_z^2}, \quad (4)$$

где  $U_r$  – радиальная составляющая, м/с;  $U_z$  – радиальная составляющая, м/с;  $U_\varphi$  – тангенциальная составляющая, м/с.

Определяющим критерием для эффективной работы сепаратора является равномерность распределения  $U$  на входе в зону сепарации – плоскость *A* (рис. 3). Этому показателю наиболее удовлетворяет сепаратор с попутным вращением, особенно при скорости вращения, равной 10 м/с, где центральная зона низких скоростей минимальна.

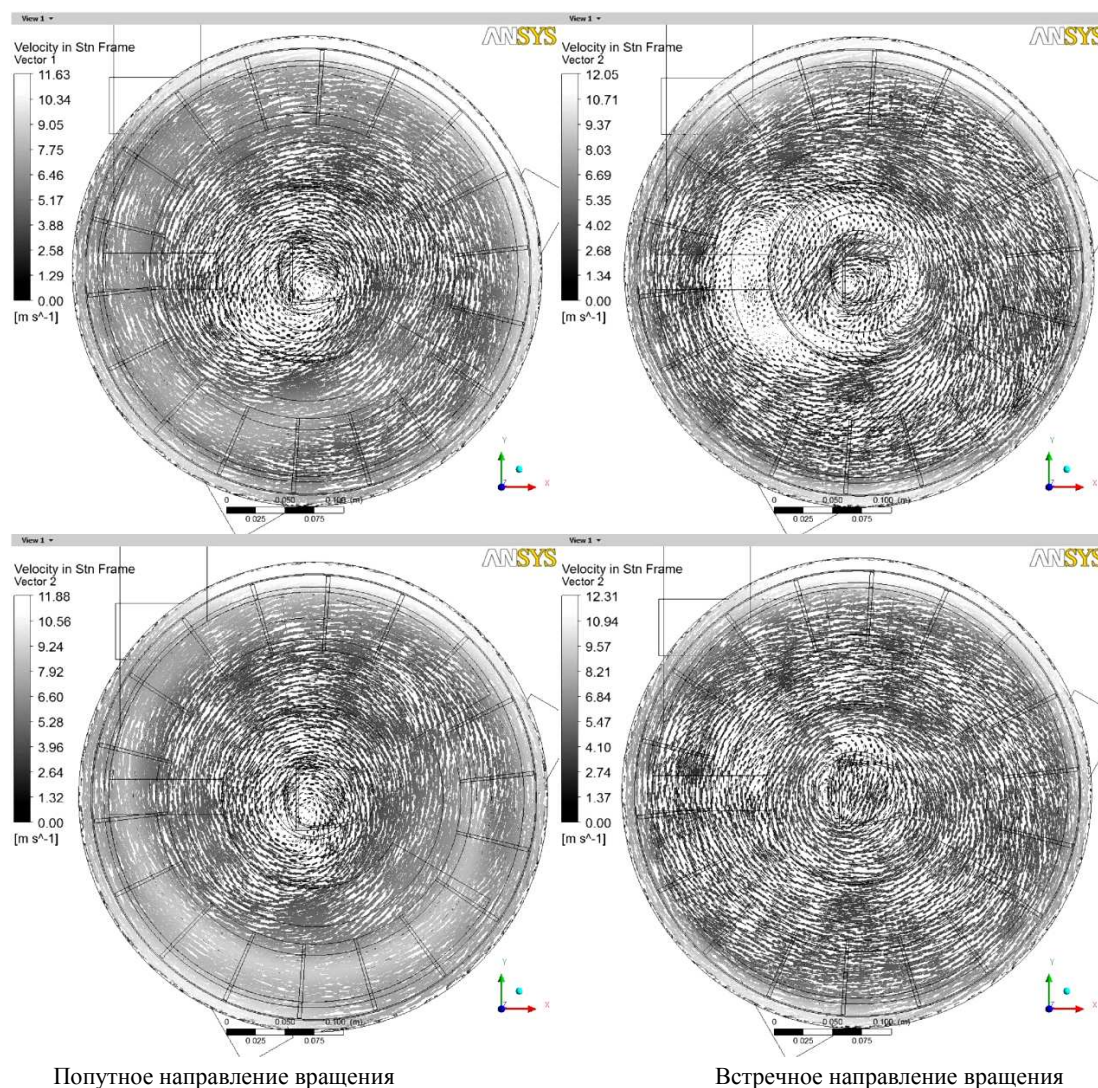


Рис. 3. Распределение полной скорости газового потока в сечении *A*



В плоскости  $B$ , проходящей через лопасти ротора, наиболее равномерное распределение скорости достигается при попутном вращении, особенно со скоростью 10 м/с (рис. 4, верхняя часть). Причем по периферийной зоне лопастей скорость максимальна (до 8 м/с), что обеспечивает проникновение через лопасти ротора частиц большего размера. При скорости вращения 20 м/с в роторе увеличивается «вентиляторный» эффект, зона высоких скоростей смещается на внутренние кромки лопастей, а снаружи скорость газового потока снижается до 6 м/с. В этом случае сепарируемые частицы будут иметь меньший размер.

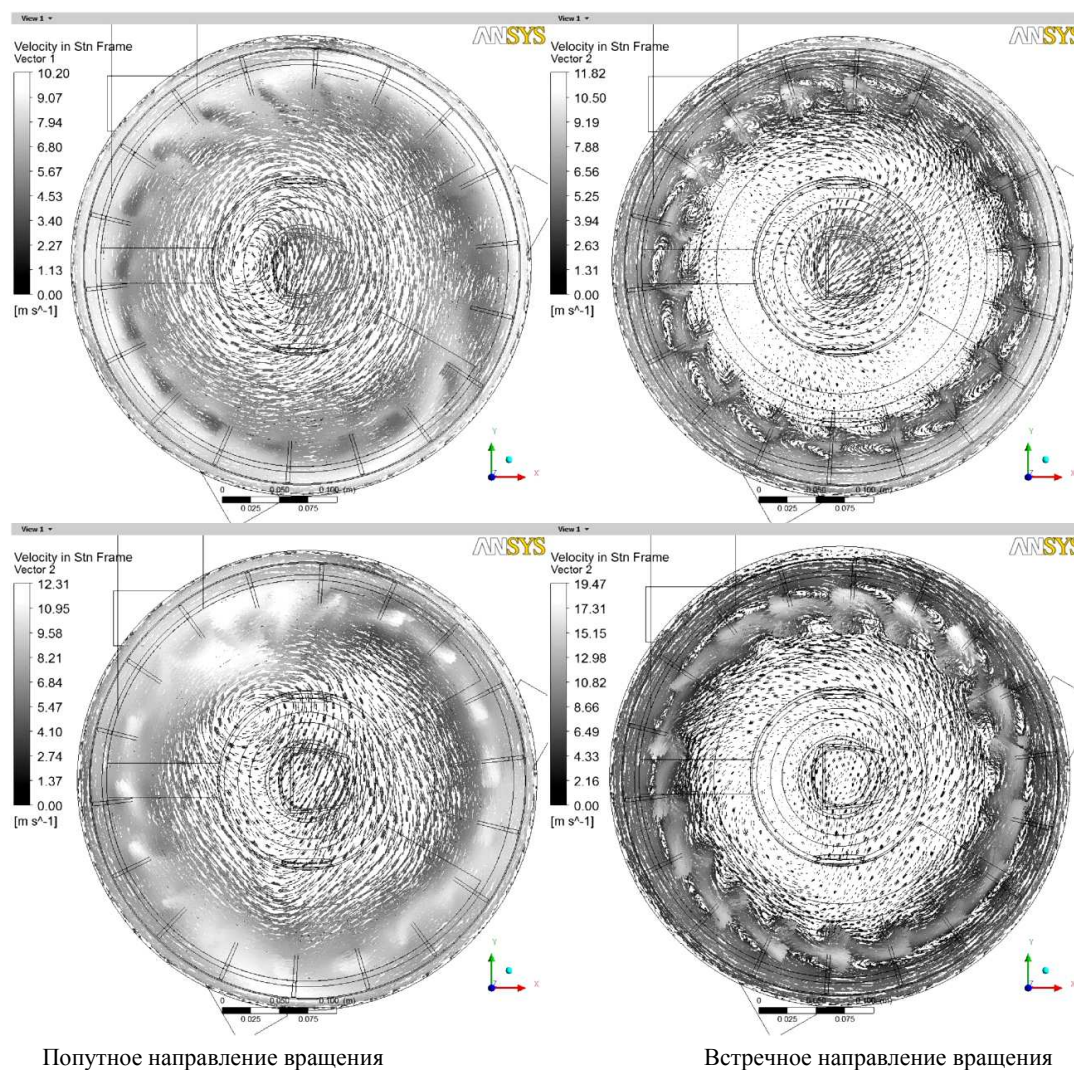


Рис. 4. Распределение полной скорости газового потока в сечении  $B$

Полученные графические зависимости составляющих полной скорости лишь дополняют результаты изменения профилей скоростей для анализируемых сечений.

При встречном вращении ротора (см. рис. 4) поток воздуха по сечению распределяется крайне неравномерно. Скорость вращения 10 м/с в принципе обеспечивает такую радиальную составляющую, которая позволит частицам проникнуть в центральное сечение ротора. Однако в зоне вблизи оси симметрии скорость газового потока резко снижается вплоть до нулевых значений. В результате существует вероятность накопления частиц в осевой зоне ротора и их случайного выброса за счет ударного воздействия лопастей без четкой сепарации.

При скорости вращения 20 м/с аэродинамическая ситуация еще более усугубляется тем, что перед внешними кромками лопастей корзины ротора образуется зона с низкой скоростью газового потока. Это препятствует проходу частиц материала между лопастями. Высокоскоростные вихри появляются только непосредственно на тыльной стороне лопастей при огибании их газовым потоком.

Рассмотрим, каким образом распределяются по сечению помольного агрегата составляющие полной скорости аэродинамического потока – осевая, радиальная и тангенциальная. Результаты анализа представлены на рисунке 5 в виде графических зависимостей.

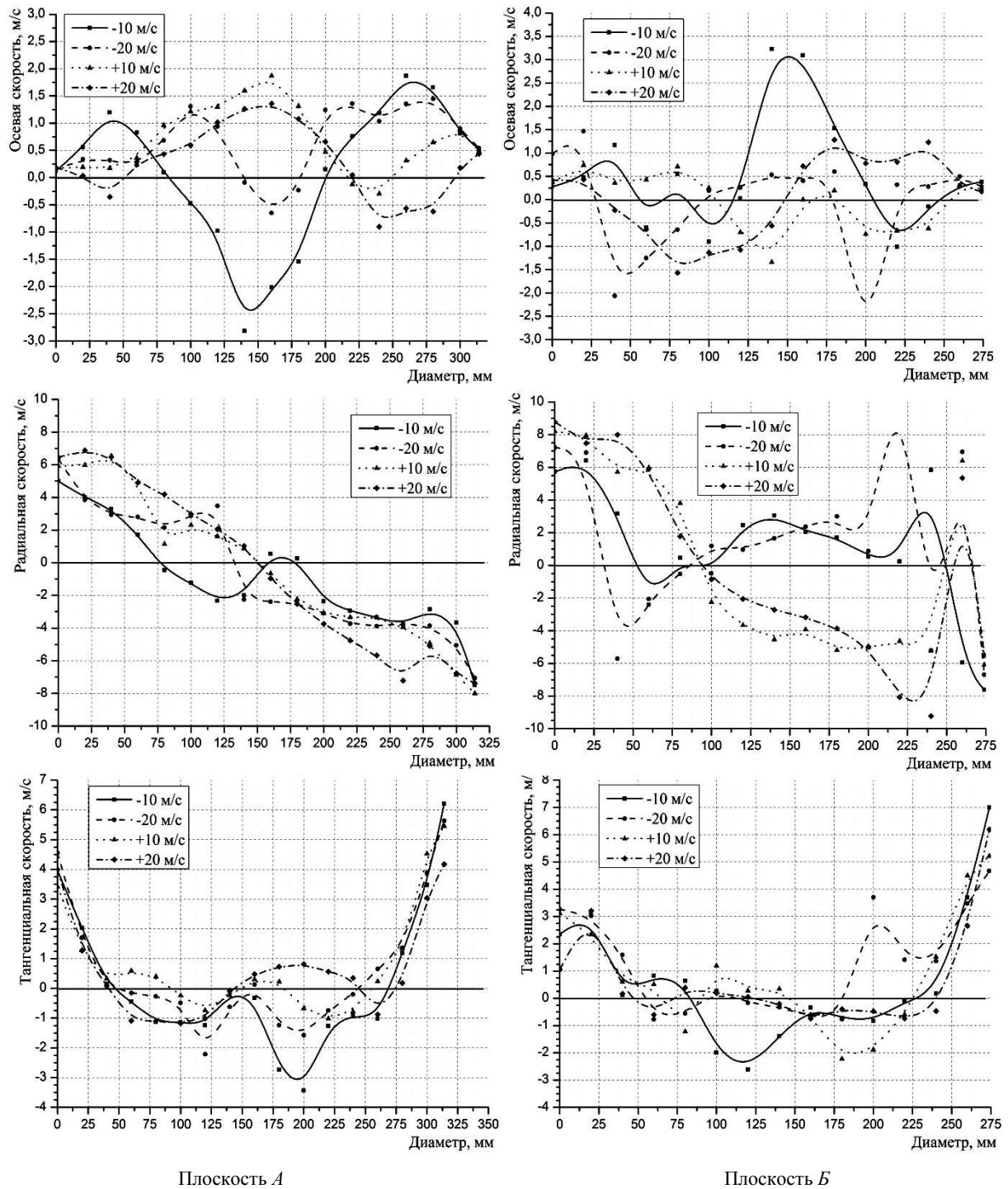


Рис. 5. Распределение составляющих полной скорости воздушного потока

Для рассматриваемых режимов работы помольно-сепарационного агрегата проведен предварительный анализ движения частиц в потоке газа. Параметры движения твердых частиц в общем случае рассчитываются по уравнению:

$$m \cdot \frac{d\bar{U}}{dt} = \Sigma \bar{F}, \quad (5)$$

где  $\Sigma \bar{F}$  – сумма всех активных сил.

В качестве активных сил будут выступать сила аэродинамического воздействия и сила тяжести частиц.

Сила аэродинамического воздействия определяется по формуле:

$$\bar{F}_D = k_\phi \cdot \frac{c \cdot \rho \cdot S}{2} \cdot |\bar{U}_i - \bar{\vartheta}| \cdot (\bar{U}_i - \bar{\vartheta}), \quad (6)$$

где  $\bar{U}_i$  – скорость воздушного потока, м/с;  $\bar{\vartheta}$  – скорость движения частицы в закрученном потоке, м/с;  $c$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  – площадь поперечного сечения частицы, м<sup>2</sup>;  $k_\phi$  – коэффициент формы частицы.

Модуль разности скоростей воздушного потока и частиц (относительная скорость) определяется следующим образом:

$$\tilde{U} = |\bar{U}_i - \bar{\vartheta}| = \sqrt{(U_r - \vartheta_r)^2 - (U_\phi - \vartheta_\phi)^2 - (U_z - \vartheta_z)^2}. \quad (7)$$

Анализ характера движения частиц различных диаметров от 10 до 100 мкм и от 200 до 1000 мкм проведен при попутном и встречном движении ротора динамического сепаратора со скоростями 10 и 20 м/с. Результаты представлены на рисунке 6 и по своему характеру во многом совпадают с предположениями, сделанными при анализе структуры аэродинамики воздушного потока. При попутном вращении со скоростью 10 м/с происходит эффективное отделение частиц размером от 300 до 1000 мкм.

Увеличение скорости вращения приводит к увеличению эффективности улавливания частицы граничных размеров от 60 до 100 мкм.

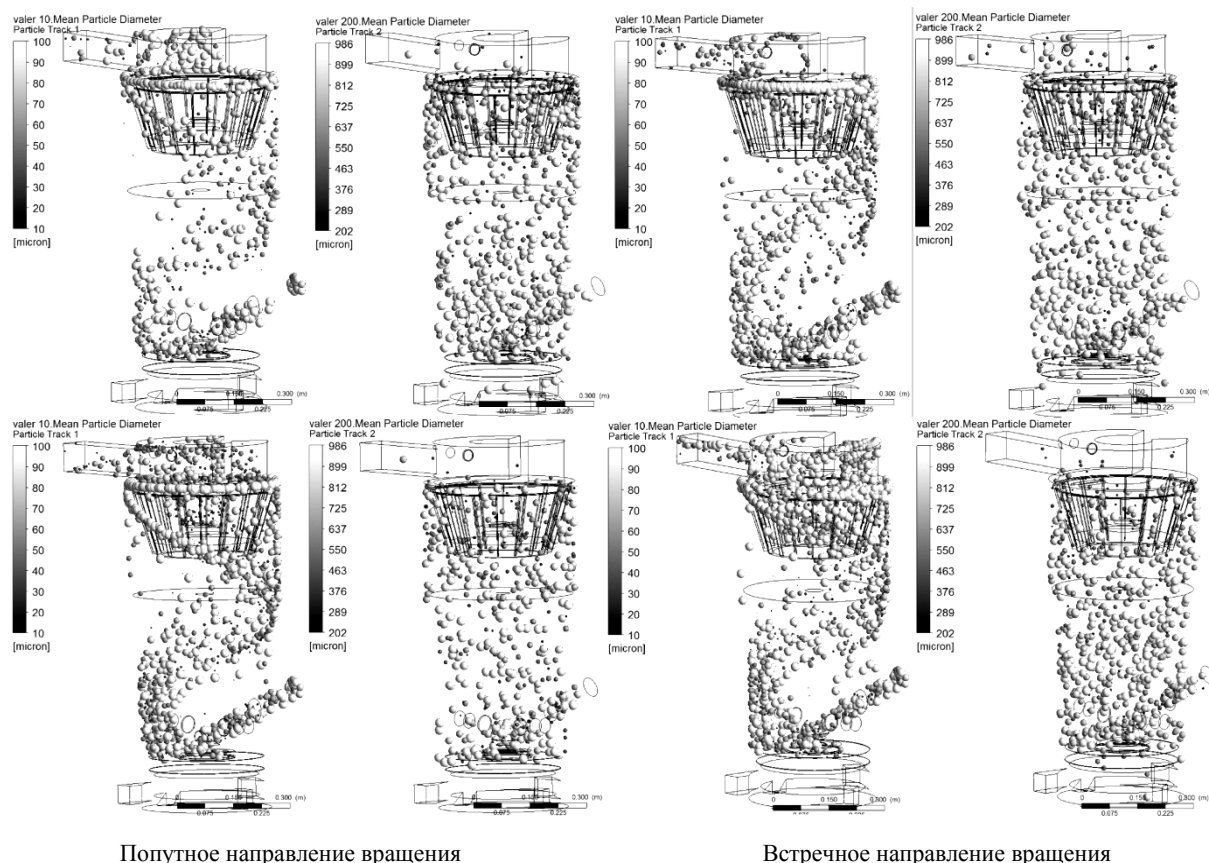


Рис. 6. Движение частиц материала в аэродинамике потока

При встречном вращении ротора со скоростью 10 м/с частицы проходят лопатки корзины внутри ротора, но за счет снижения скорости газа накапливаются в нем. Отдельные твердые частицы в значительной степени отделяются от общей массы. Однако это отделение хаотичное, преимущественно за счет ударного воздействия лопастей на частицы с последующим выбросом из внутренней зоны ротора. Поэтому эффективность разделения будет низкой. При увеличении скорости вращения до 20 м/с из-за снижения скорости газа в области ротора проникновение внутрь его частиц почти полностью прекращается и, соответственно, эффективность классификации снижается.

**Закключение.** Применение компьютерного моделирования для исследования различных технологических процессов, в частности аэродинамики, эффективности классификации позволяет с высокой степенью достоверности оценить их параметры, выявить преимущества и недостатки, найти оптимальные решения этих параметров.

На примере сепарационного устройства установлено:

- попутное с основным потоком газовой среды вращение ротора обеспечивает более эффективную классификацию частиц продукта;
- увеличение частоты вращения до определенного значения способствует уменьшению размера фракции. Но по скоростному режиму надо всегда искать оптимальное значение, поскольку возможна ситуация сплошного подвешивания частиц в сепарационной зоне, их накапливания и, как следствие, остановки процесса сепарации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Францкевич, В.С. Моделирование движения частицы материала в кольцевом зазоре валковой среднеходной мельницы / В.С. Францкевич // Весці НАН Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2004. – № 4. – С. 39 – 43.
2. Вайтехович, П.Е. Энергетика процесса измельчения в мельницах раздавливающего типа / П.Е. Вайтехович, В.С. Францкевич // Строительная наука и техника. – 2008. – № 4. – С. 18 – 21.
3. Францкевич, В.С. Моделирование движения материала в сепарационной зоне валковой мельницы / В.С. Францкевич, П.Е. Вайтехович // Химическая промышленность. – 2004. – Т. 81, № 6. – С. 295 – 300.
4. Францкевич, В.С. Исследование аэродинамики сепарационной зоны вертикальной валковой мельницы / В.С. Францкевич, А.С. Дорогокупец // Строительная наука и техника. – 2009. – № 4. – С. 72 – 75.
5. Аэродинамика закрученной струи / Р.Б. Ахмедов [и др.]. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.
6. Кнорре, Г.Ф. Теория топочных процессов / Г.Ф. Кнорре, К.М. Арефьев, А.Г. Блох. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 491 с.
7. Гупта, А. Закрученные потоки / А. Гупта, Д. Лиллей, Н. Сайред. – М.: Мир, 1987. – 588 с.

Поступила 15.04.2013

#### INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF THE DYNAMIC QUALIFIER ON AERODYNAMICS AND EFFICIENCY OF CLASSIFICATION OF THE CRUSHED PRODUCT IN THE MILL

A. DOROGOKUPETS, P. VAITSEHOVICH, V. FRANTSKEVICH

*Research of aerodynamics of the air twirled spatial stream in section of the unit including a mill and a dynamic qualifier by means of computer modelling is considered. Illustrative laws of distribution of a profile of speeds in horizontal and vertical sections are presented. Efficiency of classification of a product is shown at various speeds of rotation of a basket of a dynamic separator. It is established that passing with the basic stream of the gas environment of rotation of a rotor provides a more effective classification of the crushed product.*